

薛融晖,王光杰,底青云,等. 广东韶关某地找矿的多种地球物理方法综合应用. 地球物理学进展, 2011, 26(4):1364~1371, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.04.030.

Xue R H, Wang G J, Di Q Y, *et al.* The comprehensive application of several geophysical methods in mineral exploration in Guangdong. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(4):1364~1371, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.04.030.

广东韶关某地找矿的多种地球物理方法综合应用

薛融晖^{1,3}, 王光杰¹, 底青云¹, 李帝铨²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 综合地球物理方法可以发挥各种勘探方法的优势, 补充单一方法的不足, 并且对于单一方法无法解释的异常给出新的理论支持. 依据地质资料, 位于广东省韶关始兴良源矿区成矿母岩主要为黑云母花岗岩, 以及黑云母花岗岩蚀变后形成的白云母花岗岩或云英岩化花岗岩. 母岩在电性上均体现为高电阻率; 另一方面, 高电阻率的花岗岩一般具有低磁性的特征, 而围岩里, 中高电阻率的硅化破碎带的高磁性会比较突出, 这些特征都可以在勘探中体现出来. 因此, 在该地区进行了激电法(IP), 地面高精度磁测以及 CSAMT 野外实际测量, 并根据得到的处理结果给出了测区范围内综合方法的实测研究. 激发极化法圈定了三个极化率高值异常带, 走向均和测线大角度相交, 并和出露的矿脉位置相吻合. 其中两个也体现为高磁异常带. 处理结果圈定了研究区域内三处异常区. 并且对于不同的地球物理方法, 得到的结果是吻合的. 结合本区的已有地质资料, 这种吻合是可信的. 从而给出的地质意义解释比较可靠.

关键词 综合地球物理, 激发极化法, 磁法测量, 可控音频大地电磁法

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2011.04.030

中图分类号 P631

文献标识码 A

The comprehensive application of several geophysical methods in mineral exploration in Guangdong, Shaoguan

XUE Rong-hui^{1,3}, WANG Guang-jie¹, DI Qing-yun¹, LI Di-quan²

(1. *Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
2. *School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;*
3. *Graduate School of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract The integral application of geophysical methods could complement the flaw of the single method without damaging its advantages. It is on the leading place in Geophysical domain and presents new theoretical support to phenomena which can't be explained by single geophysical method. This article shows the surveying study of integral methods using survey result of CSAMT, IP and Magnetic Method on some place mid-north in Guangdong. CSAMT is the abbreviation of Controlled-source Audio Magnetotelluric, which is a geophysical method that mainly in mineral and groundwater exploration. While in CSAMT, the use of human controlled source could wonderfully reduce errors and suppress noise. Generally, it could find anomalous bodies buried in less than about 2 km deep and different geoelectric structure. IP and Magnetic Method are all useful geophysical techniques in mineral and ground structure exploration. As a result, integrally we use these three methods to reach the aim that makes the conclusion more reliable. Basing on successfully field work, in different methods we draw anomalous body or structure on the curve or the contour. It proves that the abnormalities got by three means in different areas tallying with each other. This tally is reliable combining with the known geological material. Therefore, the explanation about the geological signification is reliable too.

Keywords Geophysics, IP, Magnetic Method, CSAMT

收稿日期 2010-09-15; 修回日期 2010-11-20.

基金项目 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-15-4)资助.

作者简介 薛融晖, 男, 1984 年生, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事电磁法正反演研究. (E-mail: xrhtydk@126.com)

0 引言

地球物理勘探通过观测目标物地球物理场来推断勘探区地下可能存在的地质体或地质构造,并推断它们的位置、大小以及属性^[1]。直接观测的地球物理场,如地磁场、地电场、重力场和弹性波场等,有天然产生的和人工激发之分。每一种地球物理场都有对应的勘探方法,例如磁法勘探,地震勘探等。然而每种单独的勘探方法都具有局限性,例如磁法勘探只能获得地下磁性结构的信息,地震勘探只能获得地下弹性结构的信息,综合不同方法的不同物性信息才有可能可靠地转化成地质信息。

因此,近年来地球物理方法的综合使用越来越得到物探领域重视,并在实践中有着广泛的应用^[2~14]。唐建伟、丁建荣等在徐闻地区先后开展了重力、大地电磁测深、二维和三维地震等方法的综合地球物理勘探^[15];江为为、郝天珣等利用重、磁和天然地震资料对中国中南地区进行了综合地质地球物理研究^[16];李淑玲、孟小红等基于重力、航磁、地震等综合地球物理资料,对于华南桂中海相残留盆地

沉积相进行了预测^[17]。这些地球物理方法的综合应用均取得了较好的效果,因此多种物探方法综合解释是地球物理勘探的发展趋势。本文针对广东始兴良源矿区进行了激发极化法和地面高精度磁测观测,综合分析了激发极化法和地面高精度磁测以及先期完成的 CSAMT 测量资料并且进行了综合解释,获得了测区内地下地质情况的综合认识。

1 区内地质概况及勘探背景

矿区位于广东省中北部一个北东向中生代断陷盆地内。在大地构造位置上,该断陷盆地位于扬子板块东南缘的加里东褶皱带中,下古生界和上古生界地层构成了该断陷盆地的褶皱基底,燕山运动在本区经历了强烈的断裂活动并伴随广泛的岩浆作用。燕山晚期和新构造运动时期,本区长期处于隆起和剥蚀状态,导致矿区及近外围地区不仅缺失中生代地层,而且使中生代深成花岗岩体裸露于地表。燕山运动是以强烈的断裂运动和大规模的岩浆活动为特征的,并由此导致广泛的成矿作用。本区就是在这样的构造背景下,形成钨等多金属成矿带。

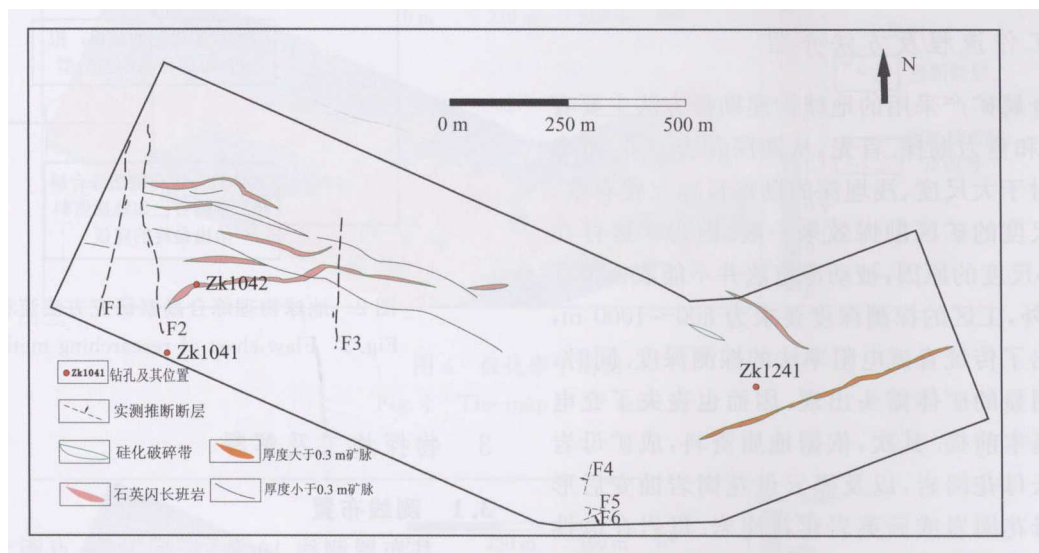


图1 测区地质略图

Fig. 1 The sketch of survey region

本区段出露地层主要为中泥盆统老虎拗组(D_2l),大体可分为上下两部,上部约70~100 m,下部约100~115 m。它的地层属一套浅变质岩系。在地球物理测区中,除左区段东南侧有几条测线在起点附近穿过老虎拗组下部地层外,整个测区地表出露的地层均为老虎拗组上部地层。矿区是主要以钨矿为主的多金属矿区,从出露岩矿来看,成矿母岩主要为各种岩浆岩,包括中细粒斑状黑云母花岗岩,它

与其后的岩脉(特别是石英闪长玢岩)带来了具有含矿元素的热流体,导致黑云母花岗岩发生强烈蚀变,使其蚀变为白云母花岗岩或云英岩化花岗岩。含石英脉往往分布在这些蚀变岩体和围岩中。多数矿脉均是岩浆活动的产物。

早期热液偏高温,形成以钨矿为主的矿体;后期中温热液形成铅、锌矿体及黄铁矿体。这些矿体通常发育在断裂带和硅化破碎带中。此外,黑云母花岗岩

形成之后,后期岩脉侵入时期的岩浆活动,特别是石英闪长玢岩脉形成时期的中酸性岩浆活动,对中低温矿床形成可能起到一定作用。

从已开采的矿区部分,以及已知的地表出露矿脉(图1)来看,矿区矿体总体展布状态呈近东西向,具体每个区段矿体的延伸方向和规模有一定差异。图1中,测区西段仅有几条由稀疏矿体组成的呈北西西向展布的矿带,宽度在100 m左右,但长达1000 m。测区东段由于地质勘探程度比较低,只在测区中部发现几条大致呈北东东走向、由断续延伸的小矿脉组成的矿带,其宽度不足15 m,长约100多米。

测区之前共打了三个钻孔,其中西侧 ZK1041 和 ZK1042 钻孔均布置在测线附近 50 m 处: ZK1041 号钻孔打到斜深 365 m 深时见到 F2 断层,之后钻进花岗岩。ZK1042 钻孔在标高 30 m 处钻到中细粒白云母花岗岩, ZK1241 钻孔在标高 70 m 钻到中细粒白云母花岗岩,可见花岗岩岩体顶部在泥盆纪围岩中呈波状起伏状态。在附近已经开采的矿区中,矿体隐伏标高一般为 220~300 m 之间。

2 勘探工作流程及方法介绍

针对金属矿产采用的地球物理勘探方法主要有电法、磁法和重力勘探。首先,从勘探方法上讲,重力勘探一般对于大尺度、浅埋深的勘察目标比较有效,但对于小尺度的矿区勘探效果一般。因为矿区存在强干扰和小尺度的原因,被动源电法并不能取得很好的效果。另外,工区的探测深度要求为 800~1000 m,这已经超出了传统直流电阻率法的探测深度。同时,由于没有明显的矿体露头出现,因而也丧失了充电法使用的基本前提。其次,依据地质资料,成矿母岩主要为黑云母花岗岩,以及黑云母花岗岩蚀变后形成的白云母花岗岩或云英岩化花岗岩。母岩在电性上均体现为高电阻率;同时,作为围岩的岩体主要为硅化破碎带,电阻率值要比花岗岩低一到两个数量级;另一方面,高电阻率的花岗岩一般具有低磁性的特征,而围岩里,中高电阻率的硅化破碎带的高磁性会比较突出,这些特征都可以在勘探中体现出来。

综合考虑,工区选用了磁法和激发极化法进行勘探。磁法勘探在寻找隐伏矿体中的作用主要是划分岩体,划分构造单元及构造位置,以及直接或者间接的找矿。由于相比于成矿母岩,矿区富集的铅矿、钨矿以及黄铁矿均会产生磁性异常,因而可能会得到比较有效的结果。激发极化法是矿产资源勘探中

常用的方法,对地下几百米尺度的电性异常反应比较精确。而且由于是主动源勘探,对外部干扰也起到了良好的压制效果。

由于 CSAMT 良好的抗干扰能力,并且可以反映地下 1 km 范围内电性异常,本文最后给出了同一测区 CSAMT 的对比效果。

实测时,结合地质资料布设测线,进行 IP,磁法数据实测,对观测数据进行处理;并结合已有的 CSAMT 测量结果及地质资料做综合解释,为矿区施工提供建议。具体流程图见图 2 所示。

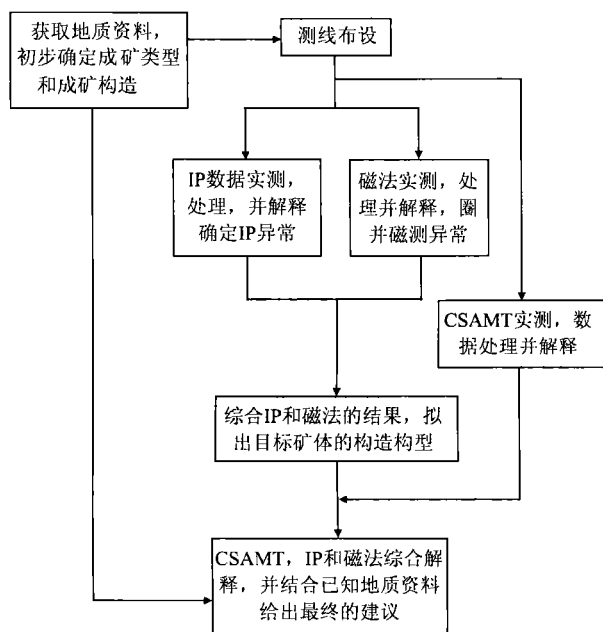


图2 地球物理综合勘察研究方法流程图

Fig. 2 Flow chart of researching methods

3 物探施工及解释

3.1 测线布置

共布置测线 19 条,长度不等,点距为 20 m,线距为 100 m,覆盖了需要测量的区域。从测点布置图可以看出共有两组平行测线。自西向东,测线号为西半区从 200~1300,东半区 300~900。IP,磁法和 CSAMT 的测量均按照上述的测点布置,这样方便结果的综合对比解释。测线及测点布置见图 3 所示。西半区 700 线中段一些点因地形原因有一定的横向偏移。

3.2 激电法测量

激发极化法(简称激电法)是通过观测与研究人工建立的直流(时间域)或交流(频率域)激电场的分

布规律,进行找矿和解决地质问题的一组电法勘探分支方法. 激电法是勘查各类金属硫化物矿床的主要方法,特别是对电阻率与围岩相差不大的金属矿

床,与电阻率法和电磁法相比,更为有效^[18, 19]. 激发极化法以激发极化效应为基础,主要的测量参数是视极化率和视电阻率.

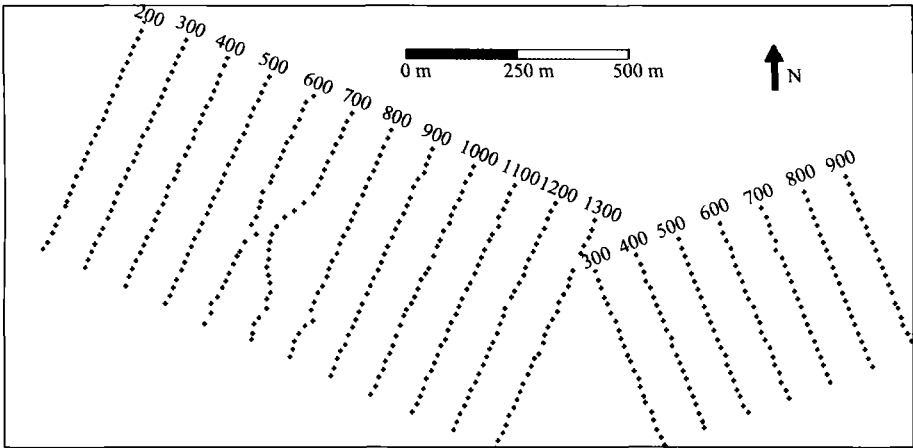


图 3 测区测点布置图(测线端部数字表示测线编号,圆点表示测点)

Fig. 3 The distributing map of the survey point(the number on top of lines represents its serial number, while cycle point means survey point)

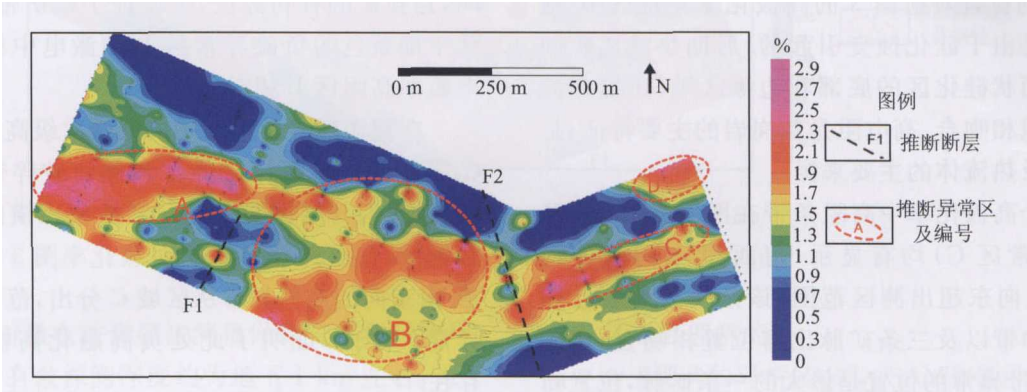


图 4 极化率平面图
Fig. 4 The map of IP ratio

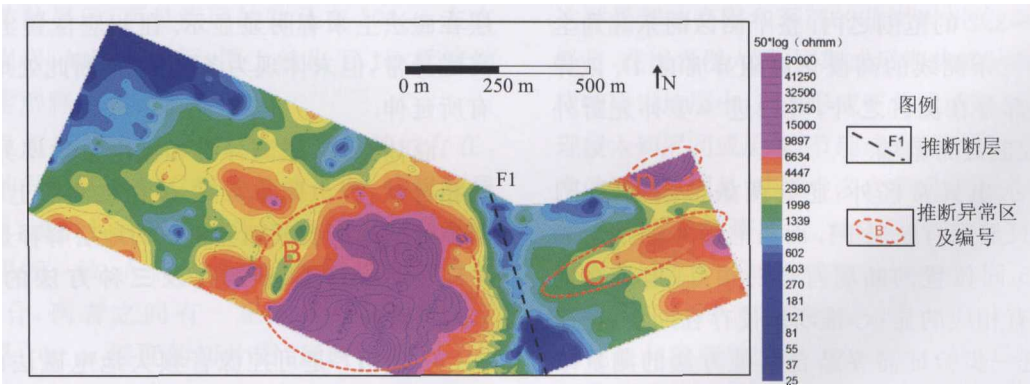


图 5 电阻率平面异常图
Fig. 5 The abnormal map of resistivity

本研究利用 DZD-6A 多功能直流电法(激电)仪进行了时间域激电测量. 主要使用了中间梯度法的装置类型: 即一次铺设供电电极(A, B)不动, 观测范围置于装置中部, 每次观测需要移动接收电极(M, N), 测量的网度为 100×20 m. 由测点极化率和电阻率数据分别构成等值线图 4 和图 5. 从图 4 可见, 区内最大的极化率值约为 3.2, 背景值大约为 0.8. 极化率等值线走向基本与侧线方向大角度相交, 且异常连续性好, 所以异常整体可靠性好, 可以做出比较明确的解释. 在图 4 和图 5 上给出了断层和局部异常范围的解释.

3.2 激电异常的解释及评价

由测量极化率结果图 4 显示, 区内极化率主要高值区共有三处, 分别是位于测区的西部的异常区 A, 中部的异常区 B 和东部的异常区 C. 高值异常 A 呈条带状自西向东延伸, 延伸约 700 m 后尖灭. 中部的异常区 B 有大片次级高极化率异常, 向南延伸超出了测区边界. 由电阻率平面异常图 5, 高电阻率异常区 B 的位置对应图 3 的高极化率异常区 B. 地表高电阻是由于硅化蚀变引起的. 后期热液成矿的空间包括面状硅化区的底部和边缘区域, 正好与高极化率区域相吻合. 高电阻是花岗岩的主要特征, 是成矿元素及热流体的主要来源.

另一个高极化率中高阻条带在图 4(异常区 C)和图 5(异常区 C)均有显示, 南西-北东向延伸约 600 m 并且向东超出测区范围, 该条带与地表已知的硅化破碎带以及三条矿脉出露位置相吻合. 在矿区, 这个条带异常的位置是最大的一条矿脉, 位置吻合的很好. 此高极化率条带南侧有一条东西方向的次级高极化异常带, 此次级异常带和测区中央高极化率条带相连. 最大峰值异常出现在测区西部中央, 大约位于 3~3.2 的范围之内. 整个测区的东北角上有一个横跨三条测线的高极化高阻异常区 D. 该异常带的主体部分在测区之外, 可以进一步补充野外工作, 从而控制异常范围.

图 4 显示出异常区外, 还有两条推断断层 F1 和 F2. 图 5 只显示有断层 F1. 而虽然图 4 的推断断层 F1 和图 5 同位置的断层符合的很好, 但是在地质资料上没有相应的显示. 推断即使存在断层, 埋深也应较深. 进一步验证需要结合其他方法的测量结果. 图 4 中的极化率异常 A 的位置上, 在图 5 上并无电阻率异常, 表明 A 处和 B, C 和 D 处的地层解释有差异.

3.4 地面高精度磁测

磁法勘探的对象是由地下岩矿物磁性差异引起的磁异常. 它得到的是地下各种构造和介质磁性的综合表现. 主要测量的是总强度磁异常 ΔT 值, 可以体现地下介质和构造因磁性差别而产生的异常^[20, 21]. 磁测采用了加拿大 SCINTREX 的 ENVI MAG 质子磁力系统, 工作方式为 1 台日变观测站和 1 台移动观测站, 经过处理得出的测区的磁异常值范围主要集中在 -110 nT ~ $+85$ nT 之间. 异常平面图如图 6 所示. 4 个异常, A, B, C, D 其位置与极化率平面图图 4 类似, 而和电阻率平面图图 5 存在明显不同. 进一步表明 A 处的地层和 B, C, D 处的地层解释有差别.

根据激电异常的解释结果研究区分布有三处高值异常. 对于磁法 ΔT 异常平面图 6, 异常区 A 的负异常基本沿垂直测线的方向, 向东主体显示出低缓的低磁异常, 南侧是整体低缓的高磁异常, 多是在低阻区和破碎带通过的部位, 这些部位给含矿流体与磁黄铁矿等高磁性金属矿物的存在和富集提供了空间, 是找矿的有利部位, 也验证了赋矿带的存在. 测区中部蓝色的负磁异常区 B 和激电中梯方法中的电阻率高阻区 B 相对应.

在地表磁异常上显示的低缓次级高磁异常区域 C, 其东侧该次级高磁异常和硅化破碎带对应关系较密切. 但与同位置激电异常的相比横向延伸向南有延伸, 直至到测区外. 此处极化率图 3 有一条近北西-南东向的高值异常从区域 C 分出, 范围在图 6 的异常 C 之内, 证明了此处负高磁化高极化异常的存在.

而在图 6 东北角显示出局部的高磁异常 C, 且异常横跨三条测线. 此处激电异常边界出现局部高极化磁异常. 另一方面, 激发极化法结果所显示的断层在磁法上未有明显显示. 在相应位置图 6 均有高磁异常, 但未体现为条带状, 推断此处地层向深部有所延伸.

总体来说, 磁测异常和激电极化率异常有良好的相符性, 但电阻率异常 A 在磁测图上不存在, 表明该处的地层和其他异常区的地层解释是不同的.

3.5 CSAMT 水平切片及三种方法的综合地质解释

CSAMT 是可控源音频大地电磁法的简称. 因为大功率人工发射源的引入, 而不是依赖于随机的天然场, 所以可以得到很高的信噪比, 数据的高可靠性也使得 CSAMT 在矿产, 水文和煤田勘探中有着广泛的应用^[22~25]. 本区也已进行了 CSAMT 的标量

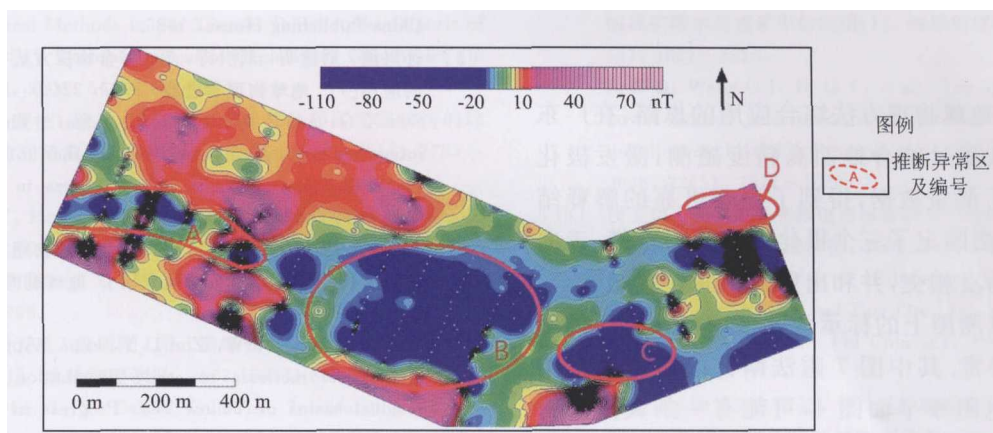
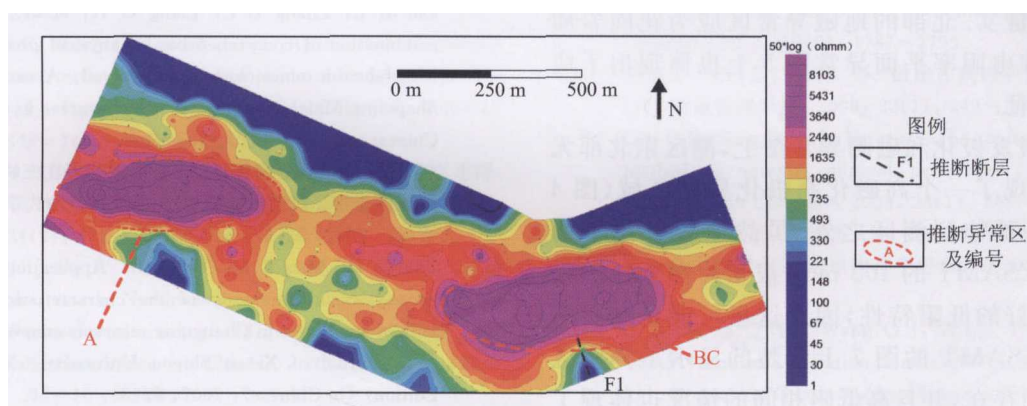
图6 ΔT 异常平面图Fig. 6 The map of ΔT 

图7 CSAMT 反演电阻率切片图(海拔 100 m)

Fig. 7 The slice map of CSAMT resistivity (100 m)

测量,可在对激电法和磁法测量做综合解释时使用. CSAMT 的有效探测深度约为地下 1 km 左右,为了和上面讨论的结果对比,这里选取了比较有代表性的海拔 100 m 深度的电阻率水平切片图进行说明.因为在 100 m 处的 CSAMT 水平切片图上,异常有着比较完整的显示.而且测区的钻孔在 100 m 左右均见到花岗岩.如图 7 所示,图上给出了 1D 反演的电阻率异常解释线和异常编号.

从图 7 可以清晰地看出三个高阻岩株的存在,其中图 3 的异常区 B 和 C 已经连在一起,这里用异常 BC 表示,表示 B 和 C 已经连在一起.这与激电法勘探的结果相一致. A 区的高阻异常与磁测的异常带并不重合,两者之间有一定的夹角,这是由于 CSAMT 是 100 m 深度的切片图,反映的是 100 m 深的电阻率分布图,而磁法图中,磁异常是场的异常,并非真实的磁性异常,地表的磁异常是地下各个深度的磁性体的总和迭加,因此异常在形态上有

差异是可以理解的.

对于图 7 的异常区 BC,CSAMT 显示此处为厚层浅变质岩地层,而此处激电异常边界出现局部高极化磁异常.另外,从右区段 900 线延伸线上可以看出,浅层变质岩地层中会出现局部地表电阻率偏高的现象.而这种局部的高阻和下部的花岗岩相关.对此现象的解释是,花岗岩侵入后,同期或后期热液从花岗岩上升到浅变质岩地层中,进而形成矿化或矿脉,或沿着原始层理侵入到层间或层理、节理或裂隙之中.对高电阻率异常的形成原因是,热液中多含硅质,浅变质岩被硅化蚀变后,局部电阻率变大.对高磁性异常的解释是,矿化蚀变的过程中,形成一定量的磁黄铁矿.

图 7 只可清晰的标出一条断层 F1. 位置与激发极化法和磁测结果吻合的很好,但是向北偏东向延伸较短,被花岗岩的高阻异常阻断.考虑图 7 为水平切片图,此处的断层推断向高海拔方向延伸.这与磁法的结果是一致的.

4 结 论

(1)依照地球物理方法综合应用的思路,在广东始兴良源矿区通过结合地面高精度磁测,激发极化法和 CSAMT 测量数据,得到了比较可靠的解释结果. 激发极化法圈定了三个极化率高值异常带,走向均和测线大角度相交,并和出露的矿脉位置相吻合. 相同位置在磁测图上的标示为测区中区和右区的南侧为高值磁异常. 其中图 7 磁法南部的高磁异常结合中梯装置电阻率平面图 4,可能有一条大体呈南北向连续分布的低阻带,推测由一条南北向的断裂造成. 断裂的存在给矿体富集提供了空间上的条件,也符合了该区高磁异常的显示结果. 断裂构造在钻孔处得到了证实. 北部的地磁异常区应为花岗岩质的围岩,这在电阻率平面异常图 5 上也体现出了应有的高阻特征.

(2)在激发极化和磁测异常图上,测区东北部无一例外的出现了一个高磁化高极化异常区域(图 4 的 D 域),并延伸到测区之外. 虽然地表矿化不明显,但是在 CSAMT 的 100 m 海拔切片图上显示了这一区域良好的低阻特性,因此这里可能是赋矿的有利部位. CSAMT 的图 7 上清楚的显示了异常区域 A 和 B 的存在,并且高低阻相间的情况也体现了围岩与断裂构造的接触关系. 总体上,也证明了高极化率,高磁异常和深部低电阻率是成矿构造的主要特征.

(3)论证了地球物理综合解释的重要性. 基于岩浆岩体高电阻率低磁化的特性,在确定目标体上可以更加准确. 磁测数据表示的是地下所有岩体和构造的综合反应,它可以体现目标体的宏观构造,对于过渡带的边界确定并不明显,而激发极化法所确定的电性边界则具有较高的分辨率,补充了磁法勘探的不足.

(4)运用地球物理综合解释方法得到较好的分析结果,与已知资料相符的很好,具有较高的可信度.

致 谢 本文得到了中国科学院知识创新工程重大项目的资助. 王妙月研究员,王若助理研究员对文章提出了很多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献 (References):

- [1] 傅承义. 中国大百科全书-固体地球物理学, 测绘学, 空间科学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985.
Fu C Y. Encyclopedia of China-Solid Geophysics, Mapping, Space Science (in Chinese) [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1985.
- [2] 孙兴国, 刘建明, 刘洪涛, 等. 综合物探方法在好力宝铜矿床的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1910~1915.
Sun X G, Liu J M, Liu H T, et al. The application of integrated geophysical prospecting method to the evaluation of Haolibao copper deposits [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(6): 1910~1915.
- [3] 涂广红, 江为为, 朱东英, 等. 综合地球物理方法对黄海地区前新生代残留盆地分布的研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 398~406.
Tu G H, Jiang W W, Zhu D Y, et al. Applying integrated geophysical methods to study distribution of pre-cenozoic residual basins of Yellow Sea. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 23(2): 398~406.
- [4] 崔敏利, 张宝林, 梁光河, 等. 黄土覆盖区钼矿综合地球物理找矿技术组合: 以沙坡岭钼矿为例[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 602~611.
Cui M L, Zhang B L, Liang G H, et al. The technical combination of comprehensive geophysical prospecting in the Molybdenum mines with loess-covered: A case study at the Shapoling Molybdenum mine [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 25(2): 398~406.
- [5] 赵军龙, 毛锁明, 胡建平. 综合地球物理在三峡重庆库区深部断裂构造特征研究中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 51~56.
Zhao J L, Mao S M, Hu J P. Application of integrated geophysics in the study of the characteristics of the deep faulted structures in Chongqing reservoir area of Three Gorges [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition) (in Chinese), 2007, 22(3): 51~56.
- [6] 崔天秀. 钾盐找矿工作中的综合地球物理-地质研究[J]. 化工矿产地质, 1995, 17(3): 198~206.
Cui T X. Collective application of geological and geophysical methods to prospecting for potash resource [J]. Geology of Chemical Minerals (in Chinese), 1995, 17(3): 198~206.
- [7] 李金玺, 吴有亮. 综合地球物理在矿山地质灾害研究及应用[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(2): 80~82.
Li J X, Wu Y L. Application of Comprehensive Geophysical Methods to Study on Geologic Hazard [J]. Mining Research and Development (in Chinese), 2010, 30(2): 80~82.
- [8] 王椿镛, 林中洋, 陈学波. 青海门源-福建宁德地质断面综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 1995, 38(5): 590~598.
Wang C Y, Lin Z X, Chen X B. Comprehensive study of geophysics on geoscience transect from Menyuan, Qinghai Province, to Ningde, Fujian Province, China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 1995, 38(5): 590~598.
- [9] 李茂榕, 王平, 王赞. 西部地下水资源勘查的综合地球物理问题——以鄂尔多斯盆地白垩系地下水勘查为例[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 119~126.
Li M R, Wang P, Wang Y. Integrated geophysical problems in the exploration of the underground water in the Chinese west—a case study of the cretaceous underground water in Ordos basin [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2001, 16(3): 119~126.
- [10] 江桂, 朱国强, 汪利民. 综合地球物理方法在浙江小梅多金属矿产勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(4): 464~469.
Jiang G, Zhu G Q, Wang L M. Application of Integrated

- Geophysical Methods in the Xiaomei Polymetallic Deposit of Zhejiang [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 2008, 5(4): 464~469.
- [11] 郝天珧, 黄松, 徐亚, 等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1785~1796.
- Hao T Y, Huang S, Xu Y, *et al.* Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 51(6): 1785~1796.
- [12] 徐亚, 郝天珧, 戴明刚, 等. 渤海残留盆地分布综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 868~881.
- Xu Y, Hao T_Y, Dai M_G, *et al.* Integrated geophysics research on distribution of residual basins of Bohai Sea [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(3): 868~881.
- [13] 田文法, 郝俊杰, 严加永, 等. 综合地球物理方法在邯邢式铁矿深部找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1442~1452.
- Tian W F, Hao J J, Yan J Y, *et al.* Application of synthetic geophysical methods to deep exploration of Hanxing-type iron deposit [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2010, 25(4): 1442~1452.
- [14] 胡卫剑, 江为为, 朱东英. 综合地球物理方法对南海西北部-印支半岛地区中生界分布的研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 522~529.
- Hu W J, Jiang W W, Zhu D Y. A study on distribution of Mesozoic strata in Northwestern South China Sea and Indo-China Peninsula using integrated geophysical methods [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2009, 24(2): 522~529.
- [15] 唐建伟, 丁建荣, 郝天珧. 徐闻地区综合地球物理勘探方法应用研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 800~807.
- Tang J W, Ding J R, Hao T Y. Application study of comprehensive geophysical methods in the Xuwen area [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 23(3): 800~807.
- [16] 江为为, 郝天珧, 胥颐, 等. 中国中南地区综合地质地球物理研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 171~183.
- Jiang W W, Hao T Y, Xu Y, *et al.* Comprehensive geological and geophysical study in middle southern region of China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(1): 171~183.
- [17] 李淑玲, 孟小红, 付立新, 等. 综合地球物理方法在华南桂中海相残留盆地沉积相预测中的应用[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2619~2626.
- Li S L, Meng X H, Fu L X, *et al.* Application of integrative geophysical methods to predicting sedimentary facies of marine residual basins in middle Guangxi province, China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2009, 52(10): 2619~2626.
- [18] 李帝铨, 底青云, 王光杰, 等. 大功率激发极化法在额尔古纳成矿带中段找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 22(5): 1621~1626.
- Li D Q, Wang G J, Di Q Y, *et al.* The application of high-power induced polarization in the middle section of Eerguna metallogenic belt [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 22(5): 1621~1626.
- [19] 汪玉琼. 激电中梯和激电测深在织金新麦铅锌矿区的综合应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(5): 551~553.
- Wang Y Q. Application of IP Intermediate Gradient and IP Sounding to Xinmai Lead-Zinc Ore [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 2008, 5(5): 551~553.
- [20] 王若, 王妙月, 底青云, 等. 巴颜喀拉块体东南缘地质构造的航磁反演成像[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1787~1793.
- Wang R, Wang M Y, Di Q Y, *et al.* The geology structure imaging by aero-magnetic data inversion at the Southeast margin of Bayan Har Block [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(6): 1787~1793.
- [21] 娄德波, 宋国玺, 李楠, 等. 磁法在我国矿产预测中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 23(1): 249~256.
- Lou D B, Song G X, Li N, *et al.* The application of magnetic method in national mineral prediction [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2008, 23(1): 249~256.
- [22] 李帝铨, 底青云, 王光杰, 等. CSAMT 探测断层在北京新区规划中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(6): 1963~1969.
- Li D Q, Di Q Y, Wang G J, *et al.* Fault detection by CSAMT and its application to new district planning in Beijing [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 23(6): 1963~1969.
- [23] 龚飞, 底青云, 王光杰, 等. CSAMT 方法对虎跳峡龙蟠右岸变形体的反应特征[J]. 工程地质学报, 2005, 14(4): 542~545.
- Gong F, Di Q Y, Wang G J, *et al.* CSAMT method for exploration of deformation bodies in Longpan area [J]. Journal of Engineering Geology (in Chinese), 2005, 14(4): 542~545.
- [24] 王若, Endo M, 底青云, 等. 导电薄层下三维岩脉的 CSAMT 响应分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 677~684.
- Wang R, Endo M, Di Q Y, *et al.* The analysis of CSAMT responses of dyke embedded below conductive overburden [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53(3): 677~684.
- [25] 刘红涛, 杨秀瑛, 于昌明, 等. 用 VLF/EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿——以赤峰柴胡栏子金矿床为例[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 276~285.
- Liu H T, Yang X Y, Yu C M, *et al.* A case study in finding concealed ores by using geophysical exploration methods in combination of VLF-EM, EH₄ and CSAMT [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2004, 19(2): 276~285.